

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELLA LUIZA COSTA

PERDAS POR SOMBREAMENTOS EM UM GERADOR FOTOVOLTAICO TÍPICO  
INSTALADO SOBRE AVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO À DISCUSSÃO  
DE PONTOS CRÍTICOS PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

PALOTINA

2021

GABRIELLA LUIZA COSTA

PERDAS POR SOMBREAMENTOS EM UM GERADOR FOTOVOLTAICO TÍPICO  
INSTALADO SOBRE AVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO À DISCUSSÃO  
DE PONTOS CRÍTICOS PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao  
curso de Graduação em Engenharia de Energia,  
Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício Romani

PALOTINA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## ATA DE REUNIÃO

Aos onze dias do mês de agosto do ano de 2021, no horário das 14:00 às 16:25 horas, na sala virtual <https://teams.microsoft.com/join/19%3aCOBctBF37WlhUFjEWnnAQRn7UF2DCRNM-E8kavO3bx81%40thread.tacv2/1628208555634?context=%7b%22Tid%22%3a%22c37b37a3-e9e2-42f9-bc67-4b9b738e1df0%22%2c%22Oid%22%3a%22c1018a70-06ee-4b9c-a1e7-f7dbe01945da%22%7d>, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia a aluna Gabriella Luiza Costa, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "PERDAS POR SOMBREAMENTOS EM UM GERADOR FOTOVOLTAICO TÍPICO INSTALADO SOBRE AVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO À DISCUSSÃO DE PONTOS CRÍTICOS PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO ENERGÉTICO".

Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo, Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca e o Prof. Dr. Maurício Romani (Orientador e Presidente da Banca).

Após avaliação a banca se reuniu na sala virtual <https://meet.google.com/dnm-ewwe-xwz> para deliberação da banca avaliadora, sendo assim ficou definido que o trabalho foi considerado **APROVADA** com conceito **93**(0 a 100) pontos.

Eu, presidente da banca, lavrei a presente ata que segue assinada por mim e demais membros:



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ROMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2021, às 16:29, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS HENRIQUE COIMBRA ARAUJO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2021, às 16:30, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **WILSON DE AGUIAR BENINCA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2021, às 16:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **3703470** e o código CRC **F18BE948**.

Aos meus avós, Bernadete e Valdir, Ildete e Bruno, que sempre estiveram do meu lado e são meus grandes exemplos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

À Universidade Federal do Paraná e todo corpo docente do curso de Engenharia de Energia, por todo conhecimento e comprometimento, que colaboraram para a minha graduação, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Maurício Romani, por ter aceitado me orientar neste trabalho e por toda dedicação.

Agradeço à empresa Ultramaq Tecnologia® e seus colaboradores, especialmente o setor de engenharia, pela parceria e pelo suporte para o desenvolvimento desta pesquisa. Gratidão a Giovana, por fornecer seu sistema para a realização dos testes.

Minha gratidão aos meus pais que não mediram esforços para tornar possível minha graduação, e à minha irmã, por todo apoio e incentivo.

A todos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional, principalmente à Beatriz, minha irmã de coração.

Também agradeço a todos os meus colegas de curso, pela oportunidade do convívio e pela cooperação mútua durante estes anos.

Ao Luka, por todo carinho, compreensão e incentivo em todos os anos de graduação.

E, por fim, agradeço todas as pessoas que, de alguma forma, foram essenciais para que alcançasse este objetivo com o qual sempre sonhei.

“Somos quem podemos ser, sonhos que podemos ter”. (Humberto Gessinger, 1988)

## RESUMO

O presente trabalho buscou avaliar perdas de potência por sombreamentos em um sistema solar fotovoltaico típico instalado sobre aviários no modelo de geração distribuída, afim de discutir pontos críticos que possam impactar o aproveitamento energético do sistema. Para tal, foi avaliado um gerador fotovoltaico real composto de 4 séries(*strings*) de 17 painéis fotovoltaicos de 450Wp cada, totalizando 30,6 kWp de potência-pico instalada. Todas as *strings* são ligadas diretamente a um mesmo inversor de frequência em entradas independentes. O inversor tem uma potência nominal de saída em CA de 25kW e conta com apenas um conversor CC/CC com algoritmo de rastreamento de máxima potência (MPPT) para atender todas as *strings*. Dois cenários distintos de sombreamento foram forçados de forma artificial no sistema real estudado, permitindo uma comparação entre os resultados de tensão, corrente e potência de um cenário sem sombreamento (cenário 0) com um cenário com todas as sombras projetadas sobre 4 painéis de uma mesma *string* (cenário 1) e outro cenário com sobras projetadas sobre 4 painéis conectados em diferentes *strings* (cenário 2). Medidas de temperatura ambiente e temperatura dos painéis (via termometria) também foram tomadas para avaliação. Os dados do sistema em todos os cenários foram coletados em três dias distintos subsequentes, sendo mantidos os mesmos horários de medidas. As medições foram realizadas ao final da tarde de dias de inverno com condições climáticas de céu limpo. Observando os resultados foi possível determinar que, quando ocorreu sombreamento em painéis de uma mesma série, ou seja, afetando majoritariamente apenas uma *string* do sistema, as perdas foram superiores quando comparadas as perdas verificadas para o cenário com sombreamentos paralelos. Isto se deveu ao fato de que, no cenário 2, o sobreamento paralelo afetou de forma igualitária todas as *strings*, reduzindo as chances de ocorrer uma corrente reversa dos módulos não-sombreados para os módulos sombreados. De acordo com os dados coletados, analisou-se que a temperatura afeta o sistema de forma menos expressiva que a irradiação. Portanto, conforme o estudo apresentado, pode-se determinar que, em casos de instalações solares fotovoltaicas rurais, onde, há uma grande área disponível para a instalação de módulos em uma mesma inclinação, é possível utilizar inversores que possuam apenas um MPPT, porém, nessas mesmas condições, quando há a possibilidade de ocorrer sombreamentos que afetaram a *string* com um sombreamento em série, é mais eficiente utilizar um inversor com, pelo menos, dois conversores MPPT ou realizar um replanejamento da distribuição das *strings* sobre o telhado.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica Rural. Sistemas fotovoltaicos em aviários. Perdas por sombreamentos. Detalhes práticos em projetos de sistemas fotovoltaicos.

## **ABSTRACT**

The present work aimed to evaluate the power losses due to shading in a typical solar photovoltaic system installed on aviaries in the distributed generation model, in order to discuss problematic points that affect the energy use of the system. To this end, a real photovoltaic generator composed of 4 series (strings) of 17 photovoltaic panels of 450Wp each, totaling 30.6 kWp of installed peak power, was evaluated. All strings are connected directly to the same frequency inverter independently. The inverter has a rated AC output power of 25kW and only has a DC/DC converter with maximum power tracking algorithm (MPPT) to serve all strings. Two distinct shading scenarios were artificially forced into the real system studied, allowing a comparison between the voltage, current and power results of a scenario without shading (scenario 0) with a scenario with all shadows projected onto 4 panels of a string (scenario 1) and another scenario with projected leftovers on 4 panels connected in different strings (scenario 2). Room temperature and panel temperature measurements (via thermometry) were also started for evaluation. System data in all scenarios were collected on three different subsequent days, considering the same measurement locations. Weather conditions were carried out in the late winter afternoon with clean weather conditions. Observing the results, it was possible to determine that, when shading occurred in panels of the same series, that is, mostly affecting only one string of the system, the losses were higher when compared to the losses verified for the scenario with parallel shadings. This is due to the fact that, in scenario 2, the parallel overshooting equally affected all the strings, with chances of a reverse current occurring from the unshaded modules to the shaded modules. According to the data collected, it was analyzed that temperature affects the system less significantly than irradiation. Therefore, according to the study presented, it can be determined that, in cases of rural photovoltaic solar installations, where there is a large area available for the installation of modules on the same slope, it is possible to use inverters that have only one MPPT, however, under these same conditions, when there is the possibility of shading that affected the string with a series shading, it is more efficient to use an inverter with at least two MPPT converters or perform a replanning of the distribution of the strings on the roof.

**Keywords:** Rural Photovoltaic Solar Energy. Photovoltaic systems in aviaries. Shading losses. Practical details in photovoltaic systems projects.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – CURVA DO SISTEMA .....                                 | 17 |
| FIGURA 2 – INFLUÊNCIA IRRADIAÇÃO NA CORRENTE .....                | 18 |
| FIGURA 3 – INFLUÊNCIA TEMPERATURA NA TENSÃO .....                 | 19 |
| FIGURA 4 – CURVA P-V PARA DIFERENTES IRRADIÂNCIAS.....            | 20 |
| FIGURA 5 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DIODO DE <i>BY-PASS</i> ..... | 22 |
| FIGURA 6 – ESQUEMA <i>OVERSIZING</i> .....                        | 23 |
| FIGURA 7 – CONEXÕES MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....                   | 25 |
| FIGURA 8 – LOCAL DA INSTALAÇÃO .....                              | 25 |
| FIGURA 9 – SOMBREAMENTOS ARTIFICIAIS .....                        | 26 |
| FIGURA 10 – ESQUEMA DE SOMBREAMENTO CENÁRIO 1 .....               | 27 |
| FIGURA 11 – ESQUEMA DESOMBREAMENTO CENÁRIO 2 .....                | 27 |
| FIGURA 12 – TEMPERATURAS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....              | 33 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| GRÁFICO 1 – GRÁFICO RELAÇÃO P-V.....           | 30 |
| GRÁFICO 2 – GRÁFICO RELAÇÃO I-V .....          | 31 |
| GRÁFICO 3 – RELAÇÃO TENSÃO E TEMPERATURA ..... | 34 |
| GRÁFICO 4 – RELAÇÃO POTÊNCIA TEMPERATURA.....  | 35 |
| GRÁFICO 5 – RELAÇÃO CORRENTE TEMPERATURA.....  | 35 |

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

|      |                                   |
|------|-----------------------------------|
| A    | - Ampere                          |
| AM   | - Massa de ar ( <i>Air Mass</i> ) |
| MPPT | - Maximum power point tracking    |
| ONS  | - Operador Nacional do Sistema    |
| p.u. | - Por unidade                     |
| STD  | - <i>Standart test conditions</i> |
| V    | - Volts                           |
| W    | - Watts                           |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>14</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....   | 15        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 15        |
| 1.2.1 Objetivo geral .....                                      | 15        |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                | 16        |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                            | <b>17</b> |
| 2.1 RADIAÇÃO SOLAR .....  | 17        |
| 2.1.1 Influência da radiação solar.....                         | 18        |
| 2.1.2 Influência da temperatura.....                            | 19        |
| 2.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....                             | 19        |
| 2.3 SOMBREAMENTO .....  | 21        |
| 2.4 INVERSORES FOTOVOLTAICOS .....                              | 22        |
| 2.5 RASTREAMENTO DE PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....               | 24        |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                               | <b>25</b> |
| 3.1.1 Descrição do sistema .....                                | 25        |
| 3.1.2 Desenvolvimento do método .....                           | 26        |
| 3.1.3 Processamento e análise de dados .....                    | 28        |
| <b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>                      | <b>30</b> |
| 4.1 ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE SOMBREAMENTO .....                  | 30        |
| 4.2 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS .....                              | 32        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                             | <b>37</b> |
| 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                  | 37        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>APÊNDICE 1 – RESULTADOS TESTES EXECUTADOS.....</b>           | <b>41</b> |
| <b>ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR .....</b>              | <b>42</b> |
| <b>ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....</b> | <b>43</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz energética do Brasil é composta majoritariamente por hidrelétricas, sendo complementada por usinas termoeletricas, seguido por demais fontes com menor participação (TOLMASQUIM, 2016).

Devido à crise hídrica que o país está enfrentando, as usinas hidrelétricas conectadas ao Operador Nacional do Sistema (ONS) apresentaram um volume útil de 54%, sendo assim, as termelétricas vêm sendo cada vez mais acionadas e devido ao alto custo de operação destas usinas, as tarifas de energia estão sofrendo acréscimos (PONTES, 2021).

Neste contexto de elevados preços da energia, o interesse pela instalação de fontes fotovoltaicas aumenta.

Unidade consumidoras da classe rural, ou seja, que praticam atividades de agricultura, pecuária ou aquicultura, vem sofrendo a redução dos descontos nas tarifas de energia. O subsídio federal, vem sofrendo a redução gradativa de 20% anualmente, até alcançar a alíquota zero em 2023, segundo o Decreto nº 9.642, de dezembro de 2018 (CASTILHO, 2020).

Com o fim dos subsídios rurais, a demanda por fontes de energia alternativas cresceu, principalmente a energia solar fotovoltaica. Além da redução dos custos de energia, dispor de fontes limpas de energia, trazem benefícios econômicos para o produtor, pois ocasiona na redução do ICMS. Com o fomento do mercado fotovoltaico, instituições financeiras trazem linhas de créditos especiais para produtores rurais que desejam implementar energia solar (CASTILHO, 2020).

Em unidades rurais do setor avícola, as estruturas dos aviários ou granjas possuem uma grande área disponível para a geração de energia solar em função da grande área de telhados. Pelo padrão de construções das mesmas e observando seu consumo energético e padrão de entrada de energia elétrica (geralmente o máximo permitido em baixa tensão), é possível realizar a instalação do sistema em uma única inclinação. Esta característica também torna possível a utilização de inversores de frequência que utilizam apenas um conversor de entrada CC/CC com algoritmo

MPPT<sup>1</sup>, tendo em vista que, em teoria, não haveria a ocorrência de diferentes níveis de irradiação no plano inclinado dos painéis por diferenças de ângulos de inclinação.

No entanto, se faz necessário avaliar com atenção as possibilidades de sombreamento no local, tendo em vista que o sombreamento dos módulos a corrente gerada, esta redução ocasiona o decaimento de produção de energia. Como o inversor atua com apenas um MPPT, a corrente das *strings*<sup>2</sup> são adicionadas, porém, quando há o sombreamento em apenas um módulo, a perda de corrente se dará por todo o sistema.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Em propriedades rurais contendo aviários, a instalação de sistemas fotovoltaicos sobre as instalações existentes tem se tornado cada vez mais viável. Por se tratarem de estruturas com grande área de telhado disponível, onde todos os módulos podem ser instalados em uma mesma inclinação, inversores de frequência que admitem várias entradas de *strings* mas apenas um conversor MPPT podem ser utilizados, sendo inclusive mais baratos do que inversores mais flexíveis que levam mais conversores em sua composição interna.

Com o aumento na demanda deste tipo de instalação fotovoltaica rural, é de grande valia verificar o desempenho deste tipo de configuração com múltiplas *strings* quando sujeita a diferentes cenários que possam vir a afetar o pleno aproveitamento energético solar disponível.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Observando o contexto introdutório e as justificativas elencadas, o presente trabalho visou avaliar as perdas na potência de saída de um sistema fotovoltaico instalado sobre um aviário, composto por quatro strings de módulos fotovoltaicos

---

<sup>1</sup> *Maximum power point tracking*. Em português, rastreamento do ponto de máxima potência.

<sup>2</sup> String, conjunto de módulos conectados em série afim de proporcionar uma tensão dentro da faixa de operação do inversor.

ligadas a apenas um único inversor com apenas um conversor MPPT, quando sujeito a diferentes cenários de sombreamentos artificiais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, podem ser elencados: avaliar a diferença de potência instantânea produzida pelo inversor quando houver diferentes cenários de sombreamento comparados com um cenário base sem sombreamento, utilizar o sistema por unidade para normalização dos resultados dos diferentes cenários, processar e comparar os resultados utilizando curvas corrente-tensão (curvas IV) e potência-tensão (curvas PV) e avaliar a interferência significativa da temperatura ambiente e dos módulos sobre os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

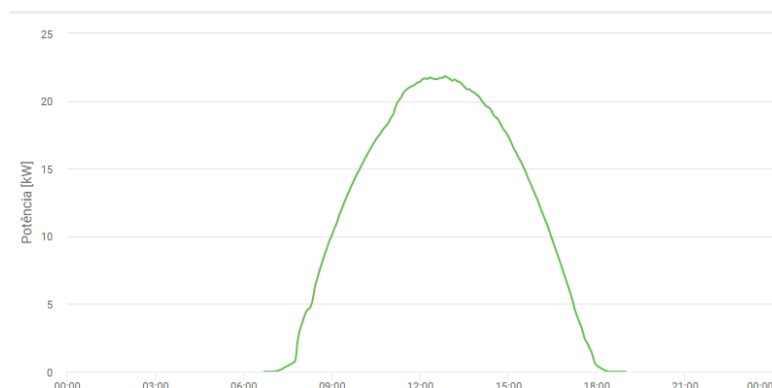
### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR

No núcleo solar, os átomos de hidrogênio sofrem uma fusão nuclear para formar átomos de hélio. Para isso transcorrer, os átomos devem ser excitados até um alto nível de energia, e quando estes regressam aos níveis de baixa energia, parte da energia é liberada na forma de radiação eletromagnética com múltiplos comprimentos de onda (MELO, 2012).

Para todos comprimentos de ondas irradiados do sol, dá-se o nome de radiação solar. A radiação é uma forma de transferência de energia, a qual ocorre, através da propagação de ondas eletromagnéticas. Esta energia é capaz de ser coletada e convertida em energia térmica ou elétrica. O efeito fotovoltaico é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A potência gerada pelo sistema é função direta da corrente e da tensão gerada pelos módulos, como a corrente depende da radiação incidente nos painéis solares, a potência também será diretamente afetada pela radiação incidente. Quando a radiação incidente decai, também irá haver um decaimento de produção. Este efeito pode ser observado através da curva do sistema ao longo do dia.

FIGURA 1 – CURVA DO SISTEMA



FONTE: O AUTOR, (2021).



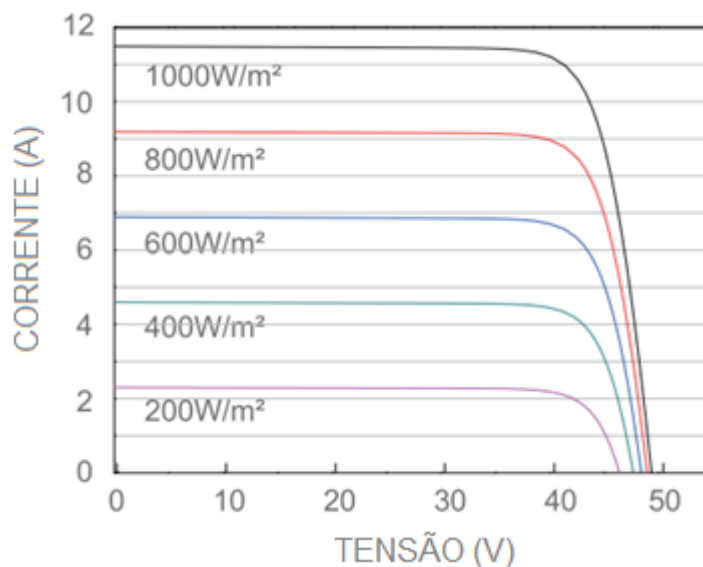
### 2.1.1 Influência da radiação solar

A corrente gerada no módulo fotovoltaico depende diretamente da radiação solar incidente sobre as placas. Em condições padrão de teste, quando a irradiância for de  $1000\text{W/m}^2$ , o módulo estará fornecendo a máxima corrente especificada no datasheet do produto (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A radiação irá interagir com a Massa de Ar (AM) até atingir os módulos fotovoltaicos, a AM é um número adimensional que resulta na razão entre a trajetória da radiação e a espessura da atmosfera terrestre. Devido a essas interações, a radiação sofre alterações até atingir a superfície terrestre. Quanto maior o valor da massa de ar, maior a alteração da radiação até atingir os módulos (MELO, 2012)

A radiação que efetivamente incide sobre as placas solares pode ser alterada por diferentes fatores, podendo sofrer quedas promovidas por nuvens, poeira, poluição, movimentações atmosféricas, entre outros.

FIGURA 2 – INFLUÊNCIA IRRADIAÇÃO NA CORRENTE



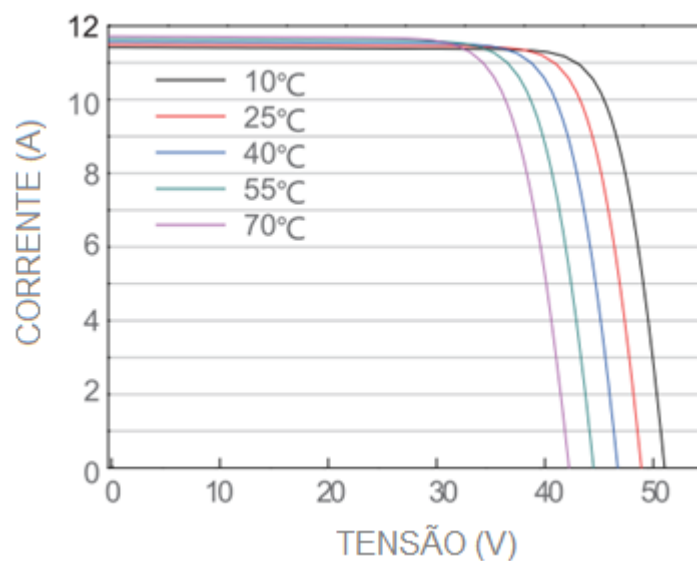
FONTE: ADAPTADO DE JA SOLAR.

A irradiação influencia principalmente na corrente gerada. Constatase que a corrente sofre uma variação drástica conforme aumenta a irradiação dos módulos.

### 2.1.2 Influência da temperatura

A temperatura dos painéis solares influencia diretamente na tensão fornecida aos terminais de forma inversa. Quando houver baixas temperaturas, a tensão gerada nos módulos é maior, enquanto, quando há temperaturas mais altas, a tensão nos terminais será reduzida (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Essa influência pode ser observada na FIGURA 2.

FIGURA 3 – INFLUÊNCIA TEMPERATURA NA TENSÃO



FONTE: ADAPTADO DE JA SOLAR.

Enquanto a temperatura atua de forma significativa na tensão, a corrente é pouco influenciada. Portanto, a potência tende a decair quando há temperaturas superiores, e aumentar em temperaturas baixas (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

As principais características dos módulos fotovoltaicos são os valores referentes ao STC<sup>3</sup>. A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é a tensão medida nos terminais quando os mesmos estão abertos, e representa o valor máximo de tensão que se dá quando a corrente é nula. Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) é a corrente fornecida pelo

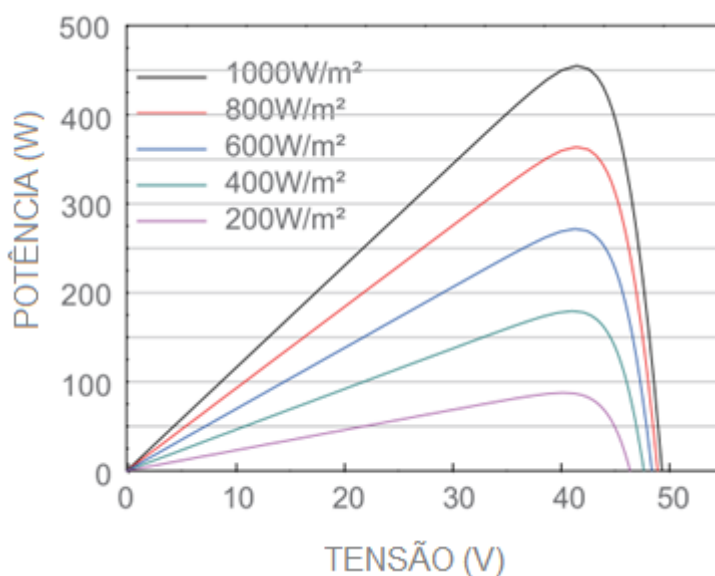
<sup>3</sup> *Standart Test Conditions*. Em português, condições de teste padrão.

módulo quando os terminais estão em curto circuito, sendo a corrente máxima que o módulo pode fornecer. Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) e corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ) são a tensão e a corrente no ponto de máxima potência mostradas nas curvas I-V e P-V e a potência de pico é a máxima potência que o módulo fornece nas condições de STC (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

A resistência à corrente inversa é o quanto de corrente o módulo suporta no sentido contrário. Ou seja, quando os módulos estão conectados em série, e um módulo recebe menos radiação que o outro, o módulo que recebe mais radiação proporciona uma corrente inversa, que irá entrar pelo terminal positivo e sair pelo negativo. Caso a corrente reversa ultrapasse os limites especificados, pode ser prejudicial aos painéis, isso pode ocorrer quando um grande conjunto de placas é conectado em paralelo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A curva característica de potência e tensão pode ser avaliada na FIGURA 3, onde é possível observar o ponto de máxima potência ( $P_{m\acute{a}x}$ ).

FIGURA 4 – CURVA P-V PARA DIFERENTES IRRADIÂNCIAS



FONTE: ADAPTADO DE JA SOLAR.

A potência pico dos módulos é alcançada quando a irradiância é igual a  $1000 W/m^2$ , que é o ponto onde ocorre a tensão e a corrente de máxima potência. Este ponto pode ser observado no gráfico da curva P-V do sistema.

## 2.3 SOMBREAMENTO

De acordo com Zomer (2013), o sombreamento pode ser provocado pela inibição da radiação direta ou pela desigualdade de irradiação difusa que incide sobre os módulos. Dos fatores que causam a redução da incidência de radiação, o sombreamento, parcial ou total dos módulos, é a principal causa da redução da corrente gerada.

Em uma instalação típica de aviário, as principais causas de sombreamento são ocasionadas por árvores, caixas d'água ou silos instalados próximos do aviário.

Quando um módulo fotovoltaico está submetido a um cenário de sombreamento total, a corrente produzida pelo mesmo é próxima a uma corrente nula. Quando as placas solares estão conectadas em série e um módulo estiver sofrendo um sombreamento, a corrente de toda a *string* é afetada, pois, acaba restringindo a corrente de todo o conjunto (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Além da perda de potência, outros aspectos do sistema podem ser causados devido ao sombreamento, como a ocorrência de *hotspots*<sup>4</sup>, instabilidade do MPPT e redução na tensão de máxima potência (ZOMER, 2013).

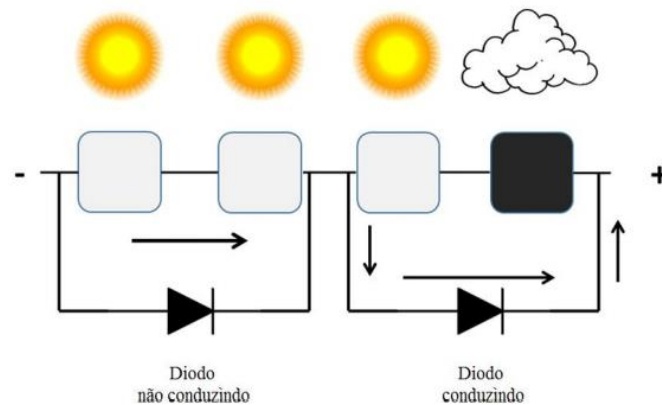
Para reduzir perdas ocasionadas, pode-se utilizar módulos que possuem diodos de *by-pass*<sup>5</sup>. Este diodo é responsável por proteger as células fotovoltaicas de correntes reversas. Quando não há sombreamento e o módulo opera em condições normais, os diodos não conduzem corrente, pois estão reversamente polarizados. Quando há uma célula sombreada, as células não sombreadas do grupo proporcionam uma corrente reversa, polarizando os diodos de *by-pass*. Desta forma a corrente deixa de cruzar as células e passa a ser conduzida pelo diodo conforme demonstrado na FIGURA 5.

---

<sup>4</sup> No português, pontos quentes.

<sup>5</sup> *By pass* quer dizer desviar, o diodo de *by pass* desvia a corrente.

FIGURA 5 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DIODO DE BY-PASS



FONTE: COUTINHO (2016).

## 2.4 INVERSORES FOTOVOLTAICOS

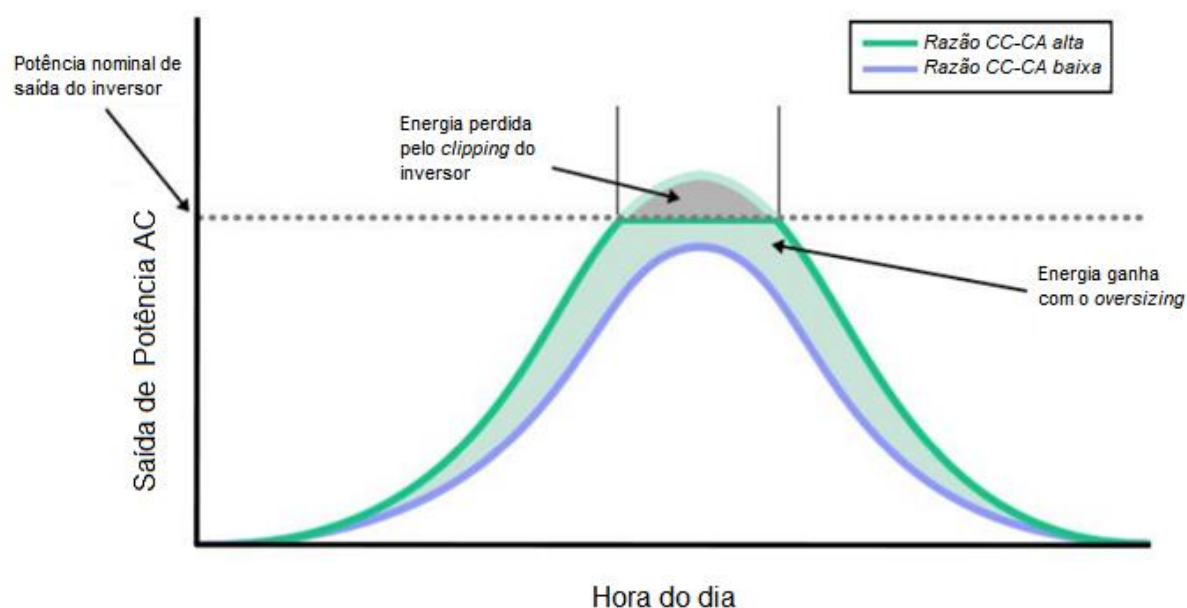
Os inversores de potência são equipamentos que tem como função realizar a conversão da corrente contínua produzida pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada. Em sistemas residenciais e comerciais são comumente utilizados os inversores *string* agrupando os módulos em série, podendo ser monofásicos ou trifásicos.

A *string* é o conjunto dos módulos conectados em série para fornecer a tensão de operação necessária, para somar a potência produzida, conecta-se *strings* em paralelo, obtendo um inversor com múltiplas *strings* (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Para obter um ganho na produção de energia pode-se adotar a estratégia de *overloading*<sup>6</sup>, ou seja, dimensionar o sistema de forma a obter uma razão CC/CA maior que um, assim, a potência pico dimensionada para as placas será superior a potência nominal do inversor. Sendo assim, o *oversizing* é feito pra melhor aproveitar a irradiação nos períodos do início da manhã e final da tarde, causando um alargamento na curva de produção. A estratégia de *oversizing* pode ser observada na FIGURA 6.

<sup>6</sup> Ou *oversizing*, é uma técnica de superdimensionamento da relação CC-CA, afim de otimizar o aproveitamento da potência nominal do inversor

FIGURA 6 – ESQUEMA OVERSIZING



FONTE: O autor (2021).

Este acréscimo na relação CC-CA, causa um aumento nas horas de operação do sistema em carga total, o que fará com que a potência de saída seja igual a potência nominal do inversor (MATEUS, 2021).

Outro recurso presente nos inversores de frequência para otimizar a produção de energia os inversores são os conversores CC/CC aos quais as strings são conectadas antes do estágio propriamente dito de inversão CC/CA. Tais conversores CC/CC são localizados junto as entradas CC dos equipamentos inversores de frequência e contam com algoritmos MPPT, podendo ser inversores de múltiplas *strings* com apenas um algoritmo ou com mais sistemas MPPTs. Os algoritmos MPPT podem operar em faixas de tensões amplas, que variam de 200V até 1000V. Para instalações que apresentam condições que resultem em diferentes condições operativas entre *strings*, como o ângulo de inclinação em relação ao solo, número de módulos conectados em série ou ângulo em relação ao azimuth, deve-se utilizar inversores que tenham dois ou mais conversores CC/CC como entradas, cada uma executando de forma independente o algoritmo MPPT.

O algoritmo MPPT, rastreia o ponto de máxima operação do inversor, ou seja, o inversor irá operar no ponto de máxima potência instantânea não dependendo das condições de operação. Um inversor que possui mais algoritmos de rastreamento pode aumentar a eficiência do sistema (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

## 2.5 RASTREAMENTO DE PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

A tensão e a corrente geradas pelos módulos fotovoltaicos não possuem um comportamento linear, pois são função da irradiância e da curva temperatura e estes parâmetros são variáveis ao longo do dia. Devido a isso, o ponto de máxima potência do sistema, varia constantemente. Por isso o rastreamento de ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos é indispensável (OLIVEIRA, 2017).

Para realizar o rastreamento do ponto máximo de potência vários métodos de otimização heurística são estudados para serem utilizados em inversores de potência comerciais. Algumas técnicas convencionais são simples de serem implementadas, porém, podem apresentar uma performance insuficiente sob dadas condições operacionais (PREVIERO *et al.*, 2020).

Quando os painéis são submetidos a cenários de sombreamento parcial, há uma redução na potência gerada, nesta situação, as técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência convencionais não conseguem assimilar o ponto de máxima potência, o que reduz a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (OLIVEIRA, 2017).

Algumas técnicas convencionais de rastreamento são a Perturbe e Observe (P&O – *Pertube and Observe*) e a Condutância Incremental (IC – *Incremental Conductance*). O método P&O causa uma perturbação na taxa de conversão, ocasionando uma mudança na corrente e na tensão, as perturbações são causadas repetidamente até atingir o ponto de máxima potência. Já a técnica IC, se baseia no fato de que a inclinação da curva P-V é zero no ponto de máxima potência, o método implementa ou decresce a tensão para rastrear o MPP, quando atingido, o mesmo será mantido (CARREIRÓ, 2021).

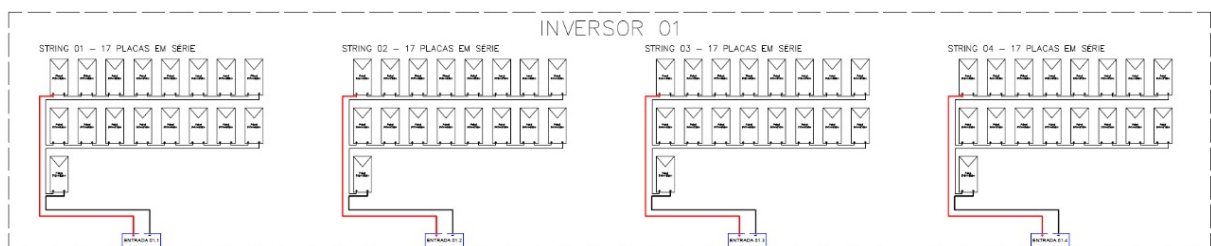
Para aumentar a eficiência na busca pelo ponto de máxima potência, algoritmos inteligentes, como redes neurais artificiais, foram desenvolvidos. O método de Perturbe e Observe foi utilizado para realizar o treinamento de redes neurais gerando uma ótima razão cíclica na direção do ponto de máxima potência (MAGNO *et al.*, 2018).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1.1 Descrição do sistema

O sistema onde foram realizados os testes é composto por um inversor Fronius Eco 25.0-3 e 68 placas JA SOLAR de 450W, conectados segundo FIGURA 7 localizado na cidade de Matelândia – PR, conforme FIGURA 8.

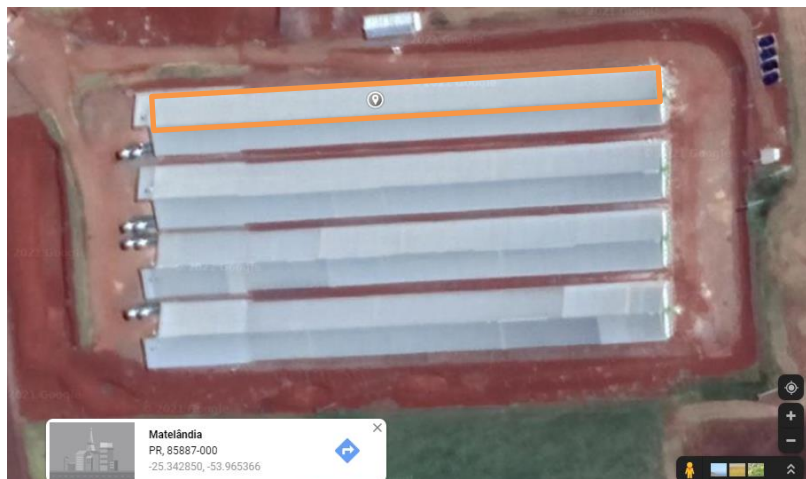
FIGURA 7 – CONEXÕES MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



FONTE: O autor (2021).

O inversor do sistema estudado tem uma potência nominal de 25 kW e é composto por 6 conexões CC conectados em 1 MPPT, apenas quatro entradas foram utilizadas e em cada *string* são conectados 17 módulos fotovoltaicos de 450W em série, totalizando os 68 módulos e uma potência pico de 30,6 kWp totalizando um *oversizing* de 22,4%. As demais informações sobre o inversor fotovoltaico e sobre os módulos fotovoltaicos nos Anexos 1 e 2.

FIGURA 8 – LOCAL DA INSTALAÇÃO



FONTE: O autor (2021).



A instalação foi realizada sobre o aviário sinalizado, na latitude -25.342874 e na longitude -53.965336, utilizando o telhado, de telhas de aluzinco, como estrutura e seguindo a inclinação do mesmo.

### 3.1.2 Desenvolvimento do método

Foram determinados dois cenários distintos para avaliar a influência do sombreamento, além de um cenário base, que consiste em nenhuma placa sombreada. O sombreamento artificial foi realizado utilizando folha de papelão, com a face interna pintada de preto, afim de evitar reflexos, causando um sombreamento total dos módulos. É possível visualizar o dois cenário de sombreamento, no momento de realização dos testes na FIGURA 9.

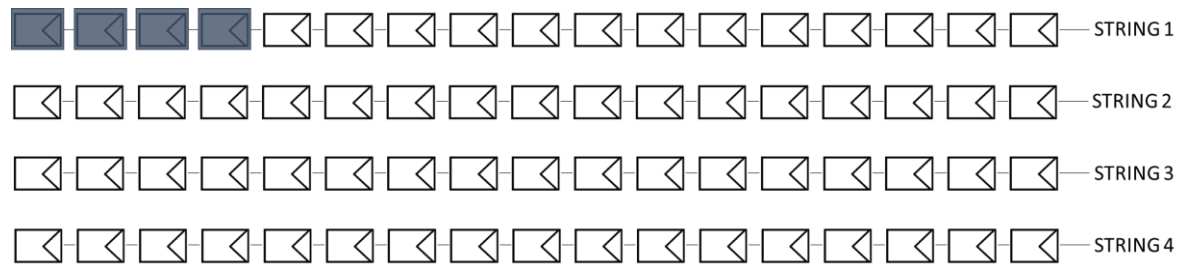
FIGURA 9 – SOMBREAMENTOS ARTIFICIAIS



FONTE: O autor (2021).

No cenário 1, foram sombreados 4 módulos em sequência em uma mesma *string*, ocasionando um sombreamento em série, de acordo com a FIGURA 10.

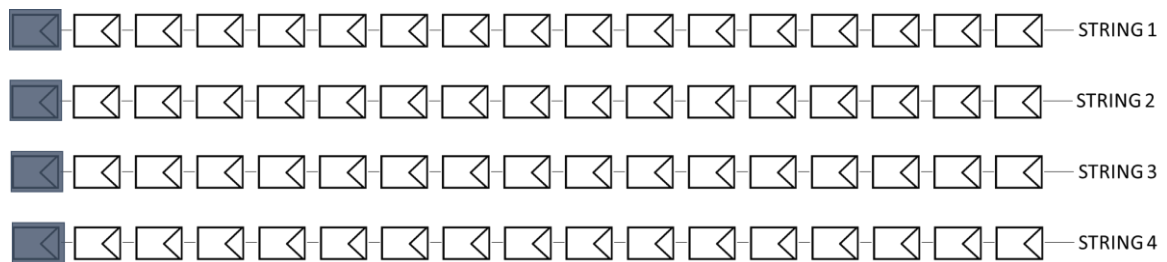
FIGURA 10 – ESQUEMA DE SOMBREAMENTO CENÁRIO 1



FONTE: O autor (2021).

Na FIGURA 11, pode-se observar o cenário de sombreamento 2, onde foi sombreado 1 módulo em cada *string*, para realizar um sombreamento em paralelo.

FIGURA 11 – ESQUEMA DESOMBREAMENTO CENÁRIO 2



FONTE: O autor (2021).

Medidas de corrente e tensão de entrada em CC e potência de saída em CA para cada cenário foram tomadas em triplicata em dias seguidos (30/06/21, 01/07/21 e 02/07/21), sendo mantidos quase os mesmos horários em cada medição (próximo das 16:20pm). Tal escolha se deu sendo almejada a obtenção de resultados em datas e horários que melhor condissessem com condições próximas a desafios enfrentados em projetos reais, onde há maior possibilidade de ocorrência de sombreamentos por interferências reais de árvores ou estruturas altas já existentes e próximas aos locais das instalações. Nos dias escolhidos para as medições, o ângulo de inclinação da instalação em relação ao zênite foi próximo ao seu máximo em decorrência da proximidade com o solstício de inverno. Os horários próximos ao final do dia também foram escolhidos sendo os mais propensos aos efeitos de sombreamento, apresentando ainda um bom potencial de geração solar aproveitável, ainda mais se tratando de um sistema com *oversizing*, como é o caso do sistema avaliado.

### 3.1.3 Processamento e análise de dados

Os dados obtidos diretamente pelos sensores do próprio inversor foram normalizados sendo utilizado o sistema por unidade (pu), amplamente usual em análise de sistemas elétricos de potência para avaliação de circuitos que apresentem diferentes zonas de tensão antes e após um elemento conversor (comumente transformadores). Para tal, foi adotada uma potência base  $P_b = 10 \text{ kW}$  e uma tensão base  $V_b = 715 \text{ V}$ .

O valor de potência base utilizado foi escolhido devido aos valores de potência instantânea obtidos nos testes possuírem o valor máximo próximo de 10kW próximo aos horários avaliados, mas se mantendo sempre abaixo deste valor. Já para base de tensão, foi utilizado o valor médio da faixa de tensão praticável pelo algoritmo MPPT indicada pelo fabricante do inversor de frequência. Uma corrente base, foi calculada a partir da EQUAÇÃO 1.

$$I_b = P_b / V_b \quad (1)$$

A transformação das unidades físicas de potência (W), tensão (V) e corrente (A) para o sistema pu foi feita pelas EQUAÇÕES 2, 3 e 4, onde as variáveis P, V e I representam as medidas coletadas.

$$P(pu) = P(W) / P_b (W) \quad (2)$$

$$V(pu) = V(V) / V_b (V) \quad (3)$$

$$I(pu) = I(A) / I_b (A) \quad (4)$$

Logo após, foram calculados os valores médios e os desvios médios dos dados para obtenção das relações P-V e I-V em cada cenário avaliado. Visando facilitar a comparação entre os cenários, os resultados foram dispostos em um mesmo gráfico IV e PV.

Foi realizada a coleta dos dados de temperatura dos módulos fotovoltaicos utilizando uma câmera termográfica compacta FLIR C5. Na tentativa de identificar uma correlação entre a temperatura e as variáveis avaliadas, foram elaborados gráficos para exemplificar as correlações. Dessa forma, foi desenvolvida uma relação entre a diferença dos valores obtidos de potência, tensão e corrente conforme a temperatura ambiente de cada dia em que se realizou os testes para avaliar a sensibilidade dos módulos de acordo com coeficientes de temperaturas. Os

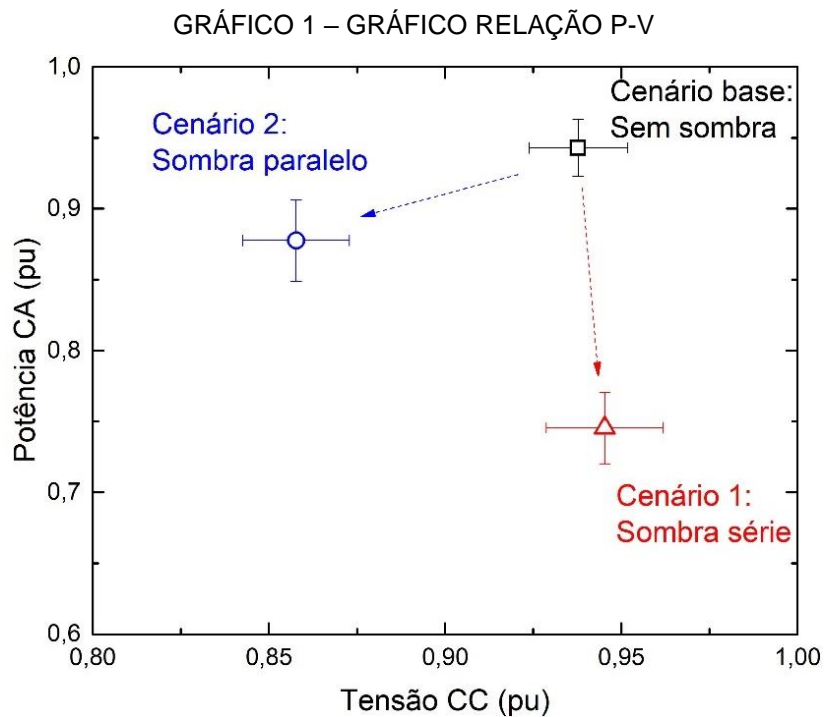
coeficientes de temperatura dos módulos fotovoltaicos avaliados, segundo a folha de dados dos painéis, são de  $+0,044\%/^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,272\%/^{\circ}\text{C}$  e  $-0,350\%/^{\circ}\text{C}$  para corrente, tensão e potência, respectivamente.

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos após aplicação da metodologia delineada conforme seção anterior. Os dados brutos mensurados durante os testes realizados estão expostos no APÊNDICE 1.

### 4.1 ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE SOMBREAMENTO

O comportamento da relação de potência e tensão dos cenários é observado no GRÁFICO 1.

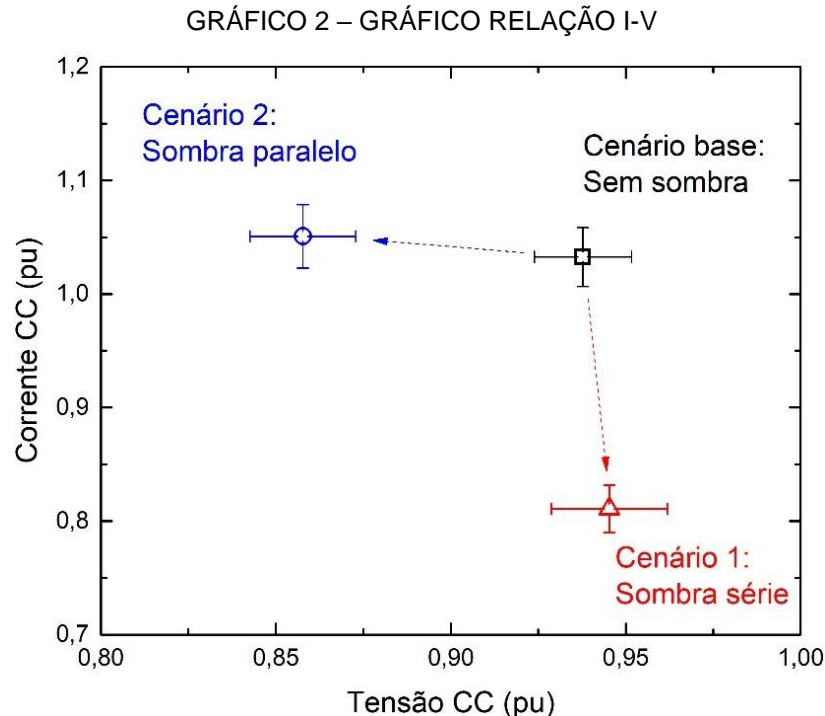


FONTE: O autor (2021).

Os valores obtidos para as potências instantâneas médias, como o esperado, foram maiores para o cenário sem sombreamento sobre os demais. O cenário 1 com as sombras em uma mesma série de painéis, sofreu a maior perda de potência produzida, com um leve ganho médio de tensão. Já no cenário 2, a perda de potência foi menos significativa, porém, houve uma queda mais acentuada na tensão.

A queda apresentada pela tensão foi ocasionada pelo algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência, afim de resultar num ganho de potência de saída.

A relação entre tensão e corrente pode ser avaliada no GRÁFICO 2.



FONTE: O autor (2021).

É possível perceber que o comportamento da corrente não é o mesmo que a potência. Em comparação com o cenário sem sombreamento, o cenário 2 apresenta um pequeno ganho de corrente, como efeito resultante do MPPT. Já o cenário 1 apresentou uma queda maior na corrente gerada, mantendo um leve aumento na tensão, para tentar compensar a perda de corrente.

De acordo com os resultados alcançados, a perda de potência por sombreamento foi mais acentuada em sombreamentos em série. Isso aconteceu pois, neste cenário, as *strings* não sombreadas, restando com uma tensão mais elevada do que a *string* com interferência de sombras, acabam por forçar a passagem de uma corrente reversa em oposição ao sentido da corrente gerada pela *string* sombreada. Sendo assim, os módulos sombreados, passam a serem vistos como uma carga para o sistema, de forma que, apenas a corrente que sobressai a corrente reserva, é a corrente efetivamente aproveitada pelo inversor.

Quando há o sombreamento em paralelo nos módulos fotovoltaicos, o efeito é similar ao ocorrido em um projeto com a redução de quantidade em um módulo em

cada série. Desta forma, a perda de tensão em todas as *strings* é igualmente distribuída. Sendo assim, o algoritmo MPPT consegue lidar com a condição, não havendo a necessidade de instalação de um inversor que possua mais sistemas de rastreamento.

Entretanto, quando o sombreamento ocorrer apenas em placas conectadas em série, a queda de corrente irá ocorrer somente onde há o sombreamento, de forma a desequilibrar as tensões de entrada que chegam ao conversor MPPT do inversor, dificultando que o MPPT atue efetivamente, prejudicando o rendimento do sistema. Posto isto, quando o sistema fica sujeito a enfrentar cenário de sombreamento em série, um inversor com mais sistemas de rastreamento de ponto máximo aumentaria a eficiência do sistema. Com um número maior de MPPT, é de se esperar que a produção na fração do sistema que não sofre o sombreamento seja preservada, havendo apenas a perda da *string* sombreada. A presença de mais um conversor MPPT, possibilita que eventuais desequilíbrios de tensão de entrada sejam isolados e regulados separadamente.

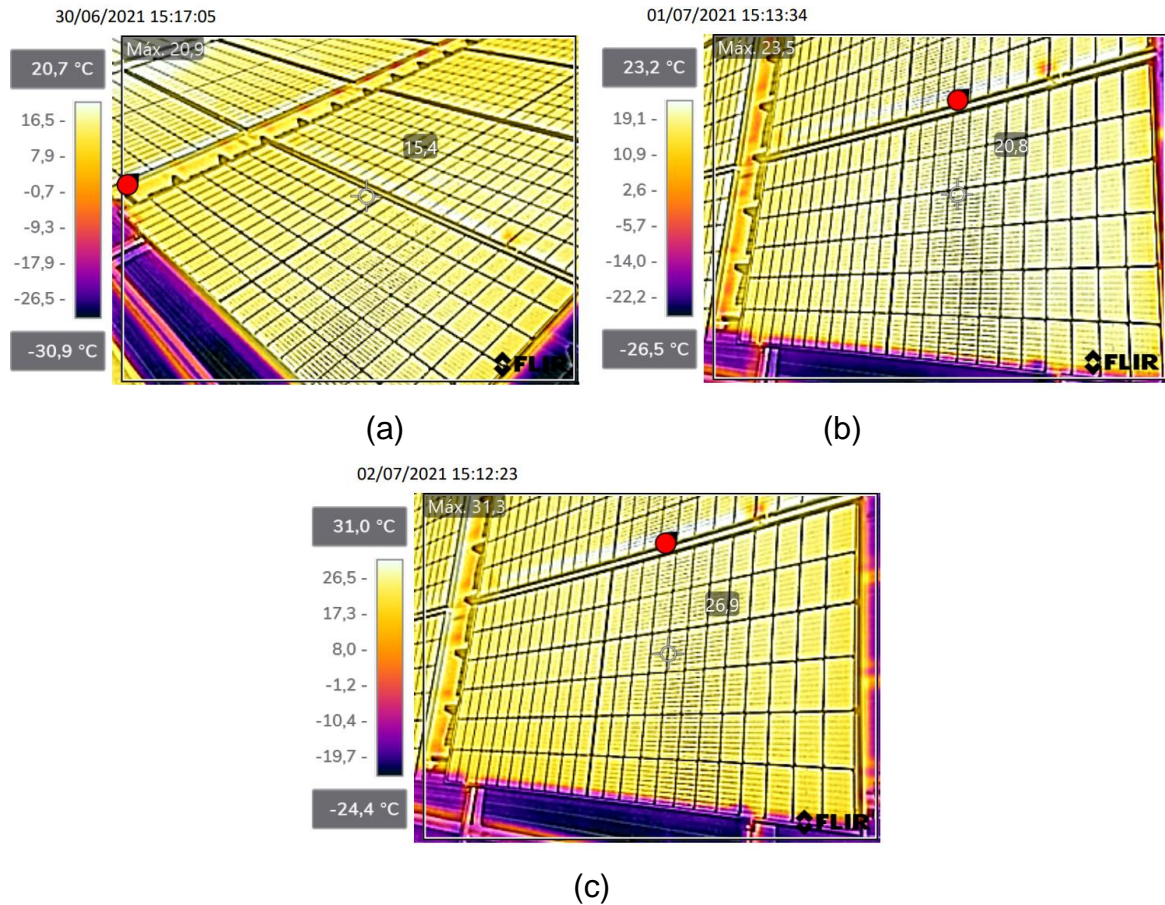
Para os dois cenários de sombreamento, foram sombreados quatro módulos fotovoltaicos, que representam 5,88% dos painéis instalados no sistema. Quando há um sombreamento em série, a perda de potência gerada percebida no sistema é de 20,93%, enquanto, no segundo cenário de sombreamento a redução da energia gerada decai para 6,91%. Portanto, a queda de produção de potência quando um sistema solar é submetido a um sombreamento em série é aproximadamente 3 vezes maior do que quando submetido a um sombreamento em paralelo.

## 4.2 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS

Com a câmera termográfica, obteve-se os valores de temperatura dos módulos nos três dias de testes. Essas temperaturas podem ser observadas na FIGURA 12.



FIGURA 12 – TEMPERATURAS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



(a) Temperatura módulos dia teste 1; (b) Temperatura módulos dia teste 2; (c) Temperatura módulos dia teste 3.

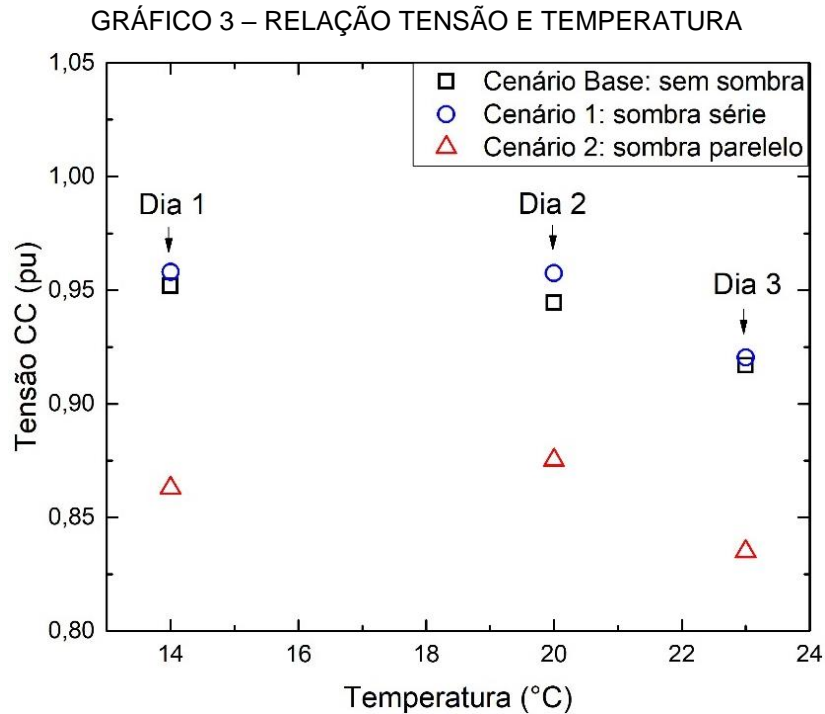
FONTE: O autor (2021).

Foram analisadas as variações na temperatura dos módulos e constatou-se os valores de 20,9°C, 23,5°C e 31,3°C, enquanto as temperaturas ambientes foram medidas em 14°C, 20°C e 23°C, nos dias de teste 1, 2 e 3, respectivamente. De acordo com as temperaturas ambientes foram desenvolvidos os GRÁFICOS 3 e 4, relacionando a temperatura com a tensão, corrente e potência.

GRÁFICO No GRÁFICO 3 pode-se analisar o comportamento da tensão em corrente contínua para cada cenário e a temperatura ambiente nos dias de testes. Os valores obtidos de tensão mostram que a tensão foi ligeiramente superior no dia mais frio em relação aos demais. A curva I-V padrão do módulo fotovoltaico mostra que quanto menor for a temperatura, maior será a tensão gerada pelo módulo fotovoltaico. Entretanto, nota-se que este comportamento não foi apresentado quando comparadas



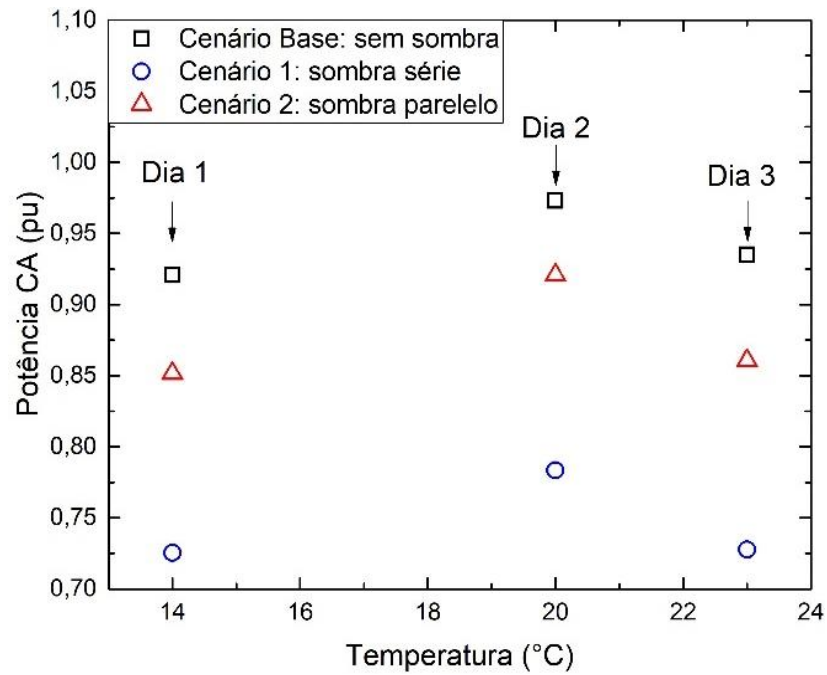
as medições obtidas para o cenário 2, onde o dia mais frio apresentou apenas o segundo maior valor de tensão.



FONTE: O autor (2021).

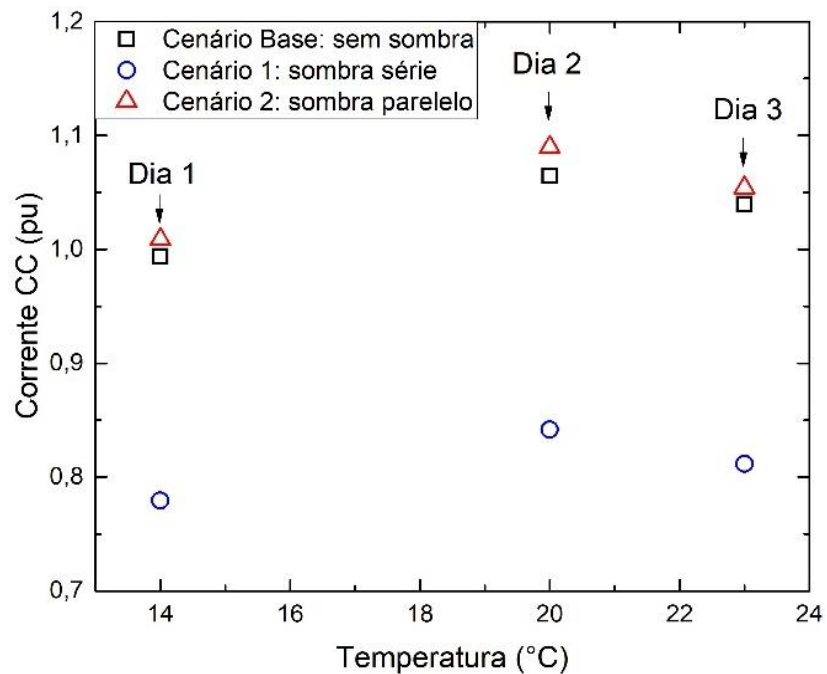
Em teoria, a temperatura altera a corrente de forma diretamente proporcional, porém menos significativa do que a tensão. Porém, a irradiação é afetada pela temperatura, possivelmente, devido a essa interação o pico de potência e corrente ocorreu no segundo dia de testes, com uma temperatura ambiente de 20°C, como pode ser avaliado nos GRÁFICOS 4 e 5.

GRÁFICO 4 – RELAÇÃO POTÊNCIA TEMPERATURA



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 5 – RELAÇÃO CORRENTE TEMPERATURA



FONTE: O autor (2021).

À vista disso, como a irradiação influencia na corrente gerada pelos módulos, os dados obtidos demonstram que no dia 2 a intensidade de radiação incidente foi superior que nos demais dias de testes. Apesar de não haver uma variação perceptível

a olho nu, a radiação pode ter sido influenciada por diversos fatores, dentre eles, nuvens de poluição, poeira sobre os módulos, velocidade do vento, horário exato das medições, que podem ter causado a divergência entre os dias de testes.

Para o estudo em questão, é possível inferir que o fator de maior influência nas discrepâncias entre os resultados esperados pela teoria e os obtidos em campo tenha sido a inexatidão do horário exato das medições, sendo que no dia 1, onde a temperatura era menor ( $14^{\circ}\text{C}$ ), foram tomadas medidas poucos minutos após os demais dias (dia 1 - 16:24pm, dia 2 – 16:20pm e dia 3 – 16:20pm).

Como o ângulo de ataque dos raios incidentes varia rapidamente próximo ao horário escolhido, poucos minutos de inexatidão foram suficientes para que a irradiação no plano inclinado dos painéis fosse bastante afetada.

Portanto, a partir dos resultados alcançados, constata-se que a irradiação é um fator muito mais influente na geração de energia solar fotovoltaica, do que a temperatura ambiente ou nos módulos. Todavia, houveram muitas variáveis não fixadas que podem ter influenciando os resultados de potência e corrente avaliados em comparação a temperatura.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da procura de sistemas fotovoltaicos rurais, que possibilitam o uso de inversores que atuam utilizando um algoritmo MPPT apenas, traz a necessidade de avaliar a eficiência desses sistemas quando sofrem um sombreamento. O presente estudo buscou avaliar o desempenho do sistema com cenários de sombreamento em série e em paralelo neste modelo de sistema.

O estudo sobre as perdas de potência ocasionadas por cenários de sombreamentos distintos, mostrou que em um cenário de sombreamento em paralelo, a perda de potência causada pelo sombreamento é 3 vezes menor que em um sombreamento em série, então, o inversor com apenas um sistema de rastreamento de ponto de máxima potência, consegue lidar com a situação imposta sem perdas significativas de potência.

Porém, quando a perda de produção de energia é advinda de um sombreamento em série, um conversor MPPT somente não é suficiente para otimizar a produção devido a ocorrência de correntes reservas entre as *strings*. Devido a isso, é indicada a instalação de inversores mais flexíveis contendo dois ou mais sistemas MPPT para que os efeitos do sombreamento possam ser reduzidos e a produção de energia possa ser otimizada.

Portanto, a escolha de modelo de inversor para um projeto, deve tomar os cuidados com os possíveis cenários de sombreamento da instalação, além disso, caso seja decidido por um inversor com apenas um MPPT, a distribuição dos painéis fotovoltaicos deve ser replanejada de forma a evitar os sombreamentos em série.

Analizou-se também a influência da temperatura ambiente e temperatura dos módulos sobre os resultados do sistema. Percebeu-se assim que a influência da temperatura afeta em menor escala os resultados quando comparada com fatores que venham a interferir na irradiação no plano inclinado dos painéis.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, são sugeridos estudos comparativos entre dois sistemas fotovoltaicos com a mesma quantidade de módulos e conexões em série, quando utilizados inversores com diferentes números de algoritmos MPPT. Pode avaliar se a temperatura dos módulos é alterada quando há um cenário de

sombreamento, quantificar a corrente reversa causada por um cenário de sombreamento em série.

Além disso, outras peculiaridades de projetos de sistemas fotovoltaicos aplicados ao meio rural devem ser avaliadas, como por exemplo, estratégias para contornar instabilidade nas redes rurais, dentre outros.

## REFERÊNCIAS

BRAUN-GRABOLLE, Priscila et al. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana**. 2012.

CARREIRÓ, Miguel Cardoso. **Controlo de MPPT para Conversor DC-DC integrado alimentado por célula fotovoltaica**. 2021. Tese de Doutorado.

CASTILHO, Viviane. Fim do subsídio eleva demanda por energia elétrica sustentável. **Globo Rural**, 20 de dez. de 2020. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Opinioao/noticia/2020/12/fim-do-subsidio-eleva-demanda-por-energia-eletrica-sustentavel.html>>. Acesso em: 21 de jul. de 2021.

COUTINHO, C. R. **Efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos fotovoltaicos**. São Mateus, 2016.

DA SILVA, L. K.G. **EFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO MÓVEL, CONTROLADO POR UM SEGUIDOR SOLAR DE 2 EIXOS**. Medianeira, 2019

DA ROSA, Antonio Robson Oliveira; GASPARIN, Fabiano Perin. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Revista brasileira de energia solar, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1421>, 2013.

FARANDA, Roberto; LEVA, Sonia. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. **WSEAS transactions on power systems**, v. 3, n. 6, p. 446-455, 2008.

LIU, Hwa-Dong et al. **A MPPT control strategy of solar power systems for low irradiance conditions**. In: 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017-ECCE Asia). IEEE, 2017. p. 932-935.

MAGNO, Luiz Carlos Cardozo et al. **Controle mppt para painel fotovoltaico baseado em redes neurais artificiais**. Uberlândia 2018.

MELO, Emerson Gonçalves de. **Geração solar fotovoltaica: estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MICHELETTI, D. H. **Avaliação da influência do sombreamento na potência instantânea de módulos fotovoltaicos**. Palotina, 2020.

OLIVEIRA JÚNIOR, Cláudio José de et al. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de inversores solares com duas entradas de MPPT**

**independentes e capacidade de rastreamento do ponto de máxima potência em condições de sombreamento parcial.** 2017.

PEREIRA, N. L.. **Energia solar uma perspectiva de sustentabilidade e viabilidade econômica.** 2016. Disponível em: <[http://tga.blv.ifmt.edu.br/media/filer\\_public/d8/35/d835273a-2326-4e0c-8f73-a7bb5cb3b72b/nilson\\_leite\\_pereira\\_-\\_energia\\_solar\\_uma\\_pespectiva\\_de\\_sustentabilidade\\_e\\_viabilidade\\_economica.pdf](http://tga.blv.ifmt.edu.br/media/filer_public/d8/35/d835273a-2326-4e0c-8f73-a7bb5cb3b72b/nilson_leite_pereira_-_energia_solar_uma_pespectiva_de_sustentabilidade_e_viabilidade_economica.pdf)>. Acesso em: 08 de maio de 2021.

PONTES, Nádia. O que deixou o Brasil à beira de uma crise hídrica histórica? **Brasil de Fato**, 22 de jun. de 2021. Disponível em: <<https://www.brasildefato.com.br/2021/06/22/o-que-deixou-o-brasil-a-beira-de-uma-crise-hidrica-historica>>. Acesso em: 17 de ago. de 2021.

PREVIERO, Gabriel R. et al. Algoritmo Híbrido de MPPT Baseado em SA-IC para Sistemas Fotovoltaicos Operando sob Sombreamento Parcial. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2020.

RODRIGUES, M. De J. Dos S., et. al. **Resultados experimentais de sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos.** Gramado: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.

SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, MAG de; CAMARGO, IM de T. **Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais.** In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE). Brasília. 2006. p. 60.

SHENGQING, Li et al. **An improved MPPT control strategy based on incremental conductance method.** *Soft Computing*, v. 24, n. 8, p. 6039-6046, 2020.

TOLMASQUIM, M. T. (coord.). **Energia Renovável:** Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica:** conceitos e aplicações. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.

ZOMER, Clarissa Debiazi et al. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações.** 2014.

## APÊNDICE 1 – RESULTADOS TESTES EXECUTADOS

|              | Dia 1 (14° - dia 30/06 - 16:24) |            |              |               |             |               |
|--------------|---------------------------------|------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
|              | Potência (W)                    | Tensão (V) | Corrente (A) | Potência (pu) | Tensão (pu) | Corrente (pu) |
| Cenário base | 9205                            | 680,6      | 13,9         | 0,9205        | 0,951888112 | 0,99385       |
| Cenário 1    | 7255                            | 685        | 10,9         | 0,7255        | 0,958041958 | 0,77935       |
| Cenário 2    | 8515                            | 617        | 14,11        | 0,8515        | 0,862937063 | 1,008865      |
|              |                                 |            |              |               |             |               |
|              | Dia 1 (20° - dia 01/07 - 16:20) |            |              |               |             |               |
|              | Potência (W)                    | Tensão (V) | Corrente (A) | Potência (pu) | Tensão (pu) | Corrente (pu) |
| Cenário base | 9729                            | 675,3      | 14,89        | 0,9729        | 0,944475524 | 1,064635      |
| Cenário 1    | 7833                            | 684,6      | 11,77        | 0,7833        | 0,957482517 | 0,841555      |
| Cenário 2    | 9208                            | 625,8      | 15,24        | 0,9208        | 0,875244755 | 1,08966       |
|              |                                 |            |              |               |             |               |
|              | Dia 1 (23° - dia 02/07 - 16:20) |            |              |               |             |               |
|              | Potência (W)                    | Tensão (V) | Corrente (A) | Potência (pu) | Tensão (pu) | Corrente (pu) |
| Cenário base | 9350                            | 655,6      | 14,54        | 0,935         | 0,916923077 | 1,03961       |
| Cenário 1    | 7276                            | 658,1      | 11,35        | 0,7276        | 0,92041958  | 0,811525      |
| Cenário 2    | 8605                            | 597        | 14,74        | 0,8605        | 0,834965035 | 1,05391       |



## ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR

| DADOS DE ENTRADA                         | FRONIUS ECO 25.0-3-S   |
|--|--|
| Quantidade de MPPT                       | 44,2 A   |
| Corrente máx. de entrada (Idc máx)       | 66,3 A   |
| Corrente máx. de curto circuito          | 580 V  |
| Mín. tensão de entrada (Udc mín)         | 650 V  |
| Feed-in tensão de entrada (Udc start)    | 580 V  |
| Tensão nominal de entrada (Udc,r)        | 1000 V   |
| Máx tensão de entrada (Udc máx)          | 580 - 850 V  |
| Faixa de tensão MPPT (Upp min - Upp max) | 1  |
| Número de rastreadores MPP               | 6  |
|  |  |
| DADOS DE SAÍDA                           | FRONIUS ECO 25.0-3-S   |
| Tensão nominal de saída (Pac,r)          | 25000 W  |
| Máx. potência de saída                   | 25000 VA   |
| Máx. corrente de saída (Iac, nom)        | 36,1 A   |
| Conexão a rede (faixa de tensão)         | 3~NPE 380 V / 220 V or 3~NPE 400 V / 230 V (+20 % / - 30 %)  |
| Frequência                               | 50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)                                   |
| Distorção harmônica total                | <2%  |
| Fator de potência (cos φac,r)            | 0 - 1 ind. / cap.  |
|  |  |
| DADOS GERAIS                             | FRONIUS ECO 25.0-3-S   |
| Dimensões (height x width x depth)       | 725 x 510 x 225 mm   |
| Peso                                     | 35.7 kg  |
| Grau de proteção                         | IP 66  |
| Classe de proteção                       | 1  |
| Categoria de sobrecarga (CC/CA)          | 2/3  |
| Consumo noturno                          | < 1 W  |
| Design do inversor                       | Sem transformador  |
| Resfriamento                             | Refrigeração de ar comprimido                                |
| Instalação                               | Montagem interna e externa                                   |
| Faixa de temperatura ambiente            | -25 a 60°C   |
| Umidade relativa permitida               | 0 a 100%   |
| Max. altitude                            | 2000 m   |
| Tecnologia de conexão                    | 6x DC+ e 6x DC- parafusos terminais 2.5 - 16 mm <sup>2</sup> |
| Tecnologia de conexão rede               | 5-pole CA de parafusos terminais 2.5 - 16 mm <sup>2</sup>    |

## ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

| PARAMETROS ELÉTRICO EM STC  | JAM72S20-450/MR/1000V   |
|---|---|
| Potência máxima avaliada (P <sub>máx</sub> ) [W]                  | 450   |
| Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> ) [V]                  | 49,7  |
| Tensão de máxima potência (V <sub>mp</sub> ) [V]                  | 41,52   |
| Corrente de curto circuito (I <sub>sc</sub> ) [A]                 | 11,36   |
| Corrente de máxima potência (I <sub>mp</sub> ) [A]                | 10,84   |
| Eficiência do módulo [%]  | 20,2  |
| Tolerância de potência  | 0≈+5W   |
| Coeficiente de temperatura de I <sub>sc</sub> ( $\alpha_{Isc}$ )  | 0,044%/°C   |
| Coeficiente de temperatura de V <sub>oc</sub> ( $\beta_{Voc}$ )   | -0,272%/°C  |
| Coeficiente de temperatura de P <sub>max</sub> ( $\gamma_{Pmp}$ ) | -0,350%/°C  |
| STC   | Irradiância 1000W/m <sup>2</sup> , temperatura do módulo 25°C, AM 1,5G                          |
|   |   |
| PARAMETROS ELÉTRICO EM NOCT                                       | JAM72S20-450/MR/1000V   |
| Potência máxima avaliada (P <sub>máx</sub> ) [W]                  | 340   |
| Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> ) [V]                  | 46,9  |
| Tensão de máxima potência (V <sub>mp</sub> ) [V]                  | 39,19   |
| Corrente de curto circuito (I <sub>sc</sub> ) [A]                 | 9,25  |
| Corrente de máxima potência (I <sub>mp</sub> ) [A]                | 8,68  |
| NOCT  | Irradiância 800W/m <sup>2</sup> , temperatura do módulo 20°C, velocidade do vento 1m/s, AM 1,5G |